KISSsoft
Calculation programs for machine design

KISSsoft 03/2017 – Tutorial 9

Dimensionamento Fino de Engrenagens Cilíndricas

KISSsoft AG
Rosengartenstrasse 4
8608 Bubikon
Switzerland

Phone: +41 55 254 20 50
Fax: +41 55 254 20 51
info@KISSsoft.AG
www.KISSsoft.AG

Índice

1 Tarefa ... 3
1.1 Tarefa ... 3
1.2 Começando o cálculo de um engrenamento (par de engrenagens cilíndricas) ... 3
2 Dimensionamento Aproximado de um Par de Engrenagens Cilíndricas ... 4
2.1 Preparando o cálculo ... 4
2.2 Abra a função de dimensionamento aproximado ... 6
2.3 Modificações ... 8
3 Dimensionamento Fino ... 11
3.1 Abrindo a função de dimensionamento fino ... 11
3.2 Resultados da função dimensionamento aproximado ... 14
3.3 Dimensionando um perfil de dente alto ... 15
3.4 Mais detalhes sobre análise de rigidez ... 18

1 Tarefa

1.1 Tarefa

Um par de engrenagens cilíndricas deve ser projetado da maneira que tenha uma vida útil de 5000 h, transmitindo 5 kW a uma velocidade de 400 rpm na entrada (fator de aplicação = 1.25). A relação de transmissão deve ser 1:4 (redução de velocidade) e o material das engrenagens deve ser 18CrNiMo7-6. O sistema deve ser otimizado para menor ruído e melhor razão de condução. A resistência deve ser calculada segundo especificado na norma ISO 6336 Método B.

1.2 Começando o cálculo de um engrenamento (par de engrenagens cilíndricas)

Você pode abrir o KISSsoft assim que o programa estiver devidamente instalado e com sua licença ativada. Geralmente o programa encontra-se em:
"Iniciar→Todos os programas →KISSsoft 03-2017→KISSsoft"
A interface do programa abrir-se-á como mostra a figura abaixo:

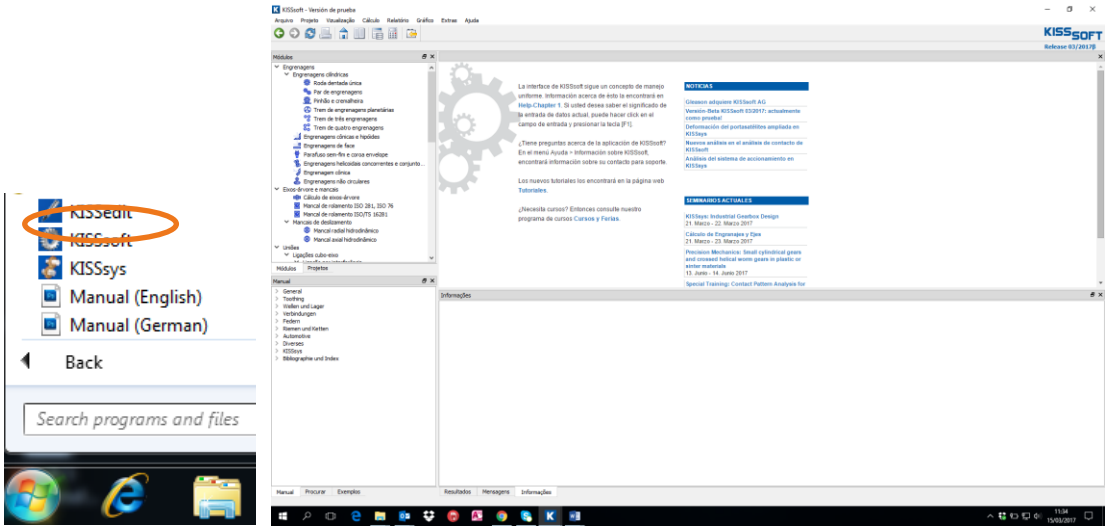


Figura 1. Abrindo o KISSsoft, janela inicial

Na aba **"Módulos"**, clica no cálculo "Par de engrenagens" del árbol de módulos:

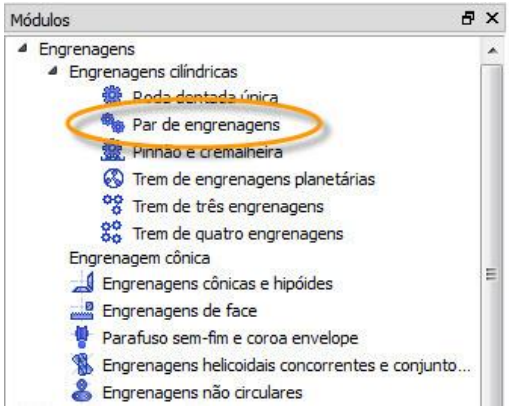


Figura 2. Abrindo o módulo de cálculo para um par de engrenagens

Para abrir o exemplo usado neste tutorial, clique em "Arquivo/Abrir" e selecione "Tutorial-009-Step1" (até "Tutorial-009-Step5") ou selecione a partir da aba **"Exemplos"**. Cada seção deste tutorial descreve qual arquivo você precisa abrir (como mostra abaixo).

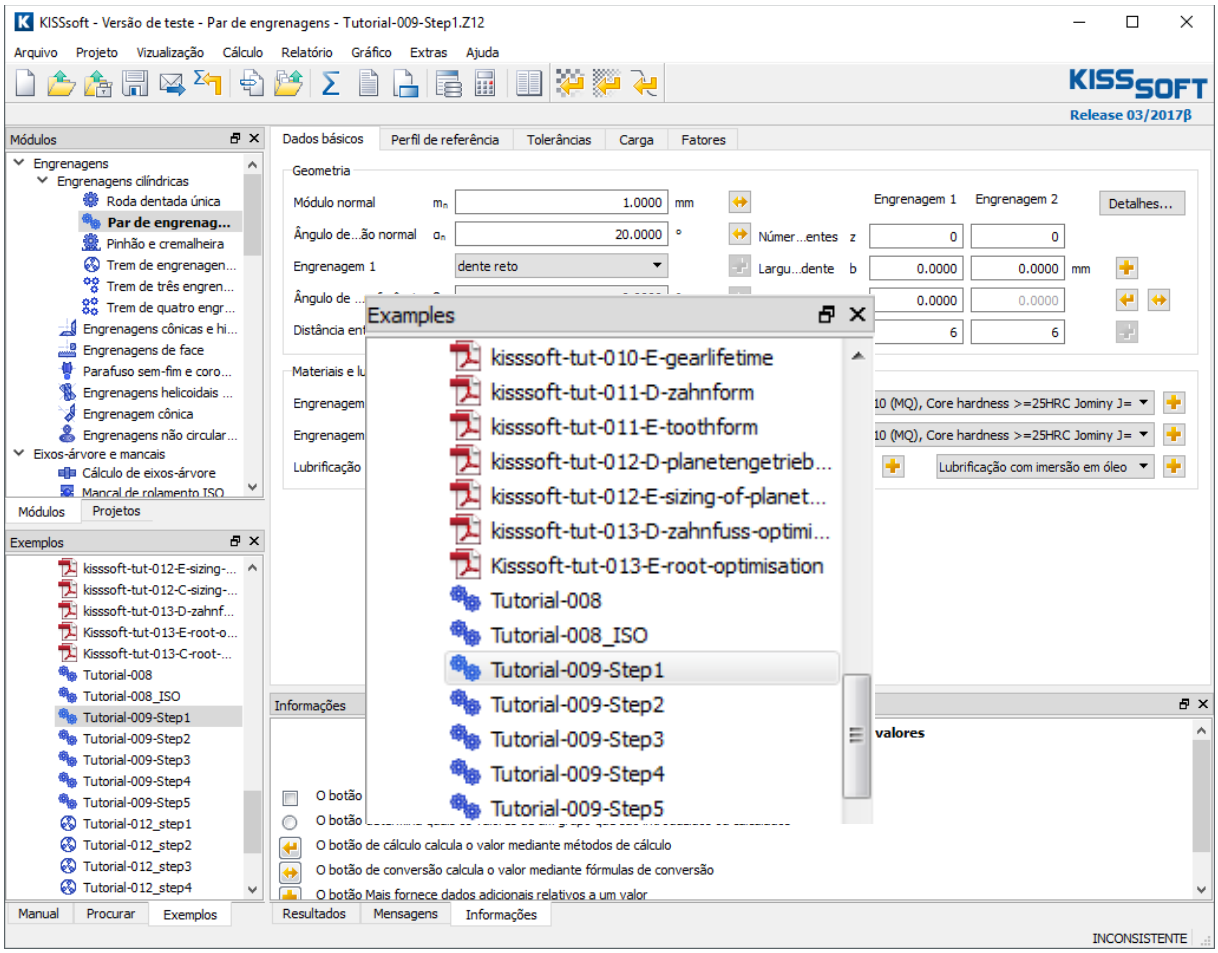


Figura 3. Opções para abrir, em diferentes estágios, arquivos de exemplos que serão usados neste tutorial

2 Dimensionamento Inicial de um Par de Engrenagens Cilíndricas

2.1 Preparando o cálculo

Antes de iniciar a ferramenta de dimensionamento inicial, você deve inserir os parâmetros básicos da tarefa para as abas “Dados básicos” e “Carga”. Na aba “Dados básicos”, entre com o material 18CrNiMo7-6 na lista do grupo Materiais e lubrificação

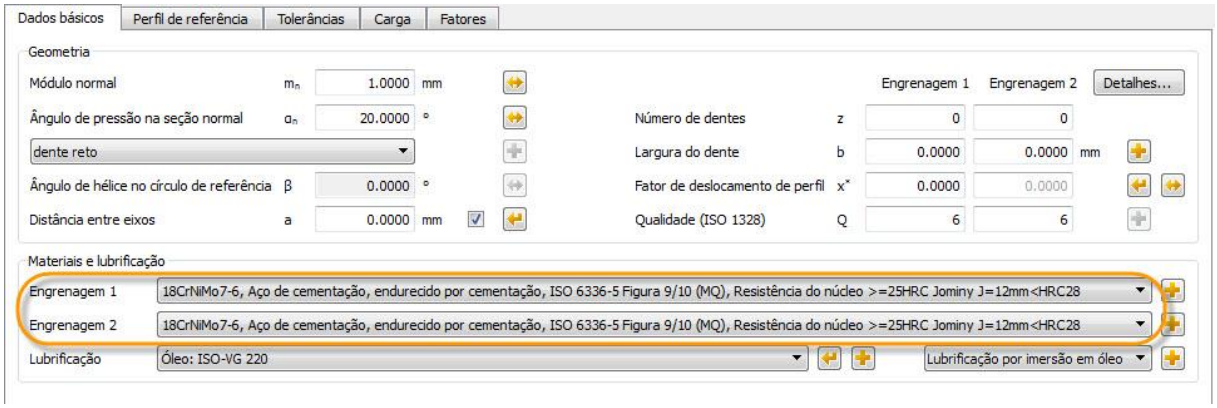


Figura 4. Seção referente a materiais e lubrificação na aba de dados básicos

Os valores de referência para os fatores de segurança podem ser especificados no "Ajustes específicos do módulo", na aba "seguranças nominais".

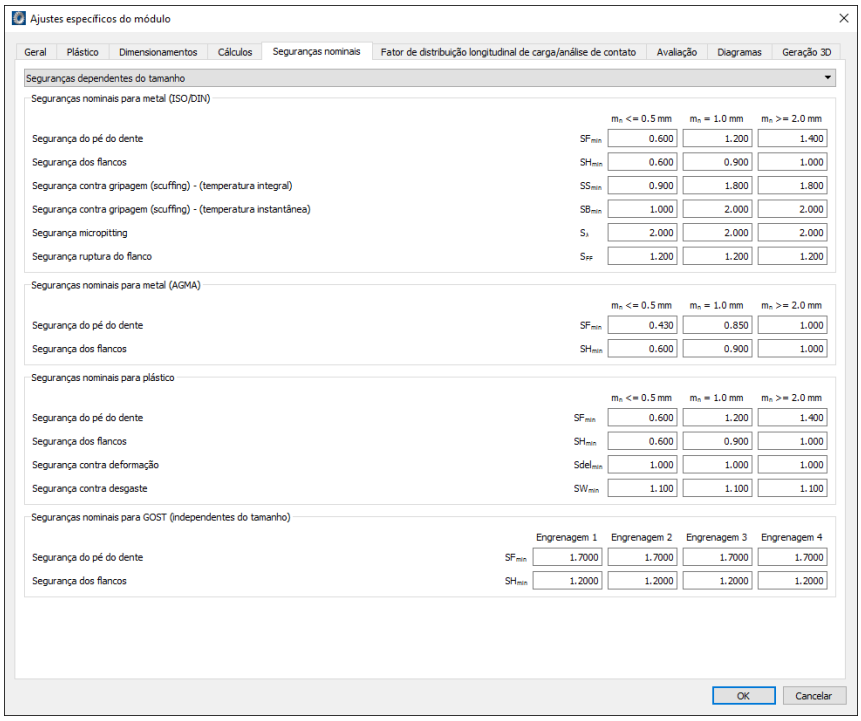
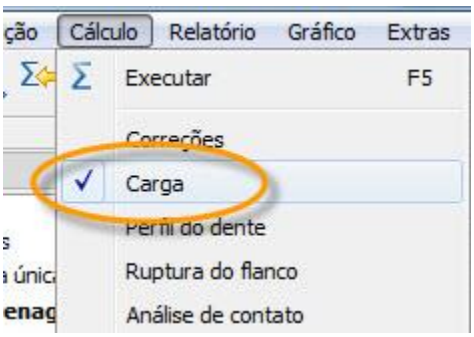


Figura 5. Ajustes específicos do módulo

Logo, clique **"Cálculo"→ "Carga"** para abrir a aba de **Carga**, se esta não tiver aberta. Nesta área, você pode inserir os dados referentes à vida útil, potência, velocidade e fator de aplicação, assim como o método de cálculo da resistência.



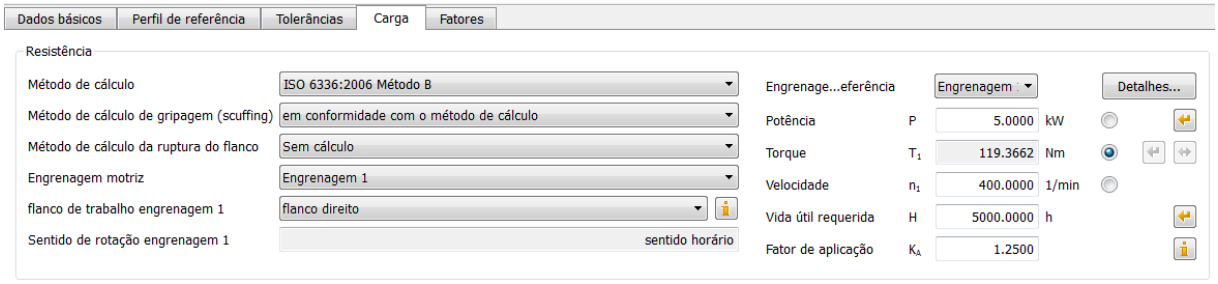


Figura 6. Dados de engrenamento na aba referente à carga

Para acessar diretamente este estágio do processo de cálculo, abra o arquivo "Tutorial-009-Step1"

2.2 Abra a função de dimensionamento inicial

Use o dimensionamento inicial para criar uma idéia inicial sensata das dimensões do seu engrenamento. Para tal, entre com os valores requeridos pela funcão após abrí-la em **"Cálculo"→ "Dimensionamento inicial".**

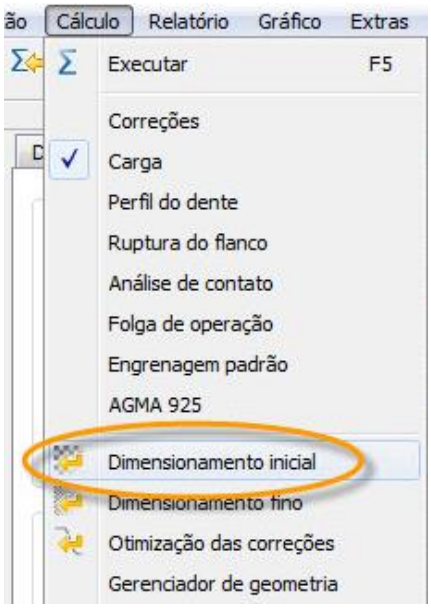


Figura 7. Abrindo o dimensionamento inicial

A parte mais importante é que você defina a relação de transmissão requerida (assim como um valor percentual da variação da mesma. No exemplo abaixo, esta variação é de 5%). Você também pode escolher um ângulo de hélice ou fixar a distância entre eixos. O ângulo de hélice depende do tipo de rolamento utilizado no eixo. O ângulo de hélice pode ser maior ou menor, dependendo de quanta força axial possam suportar os rolamentos. Este ângulo pode ser otimizado depois durante o dimensionamento fino. Aqui na função de **"Dimensionamento inicial"**, como o próprio nome sugere, você deve entrar com o um valor

aproximado para o ângulo de hélice, ou zero para dentes retos. Na parte mais abaixo da janela “Dimensionamiento Inicial”, você pode entrar com dados adicionais como uma faixa de valores para o número de dentes do pinhão, proporções de geometria e de distância entre eixos.

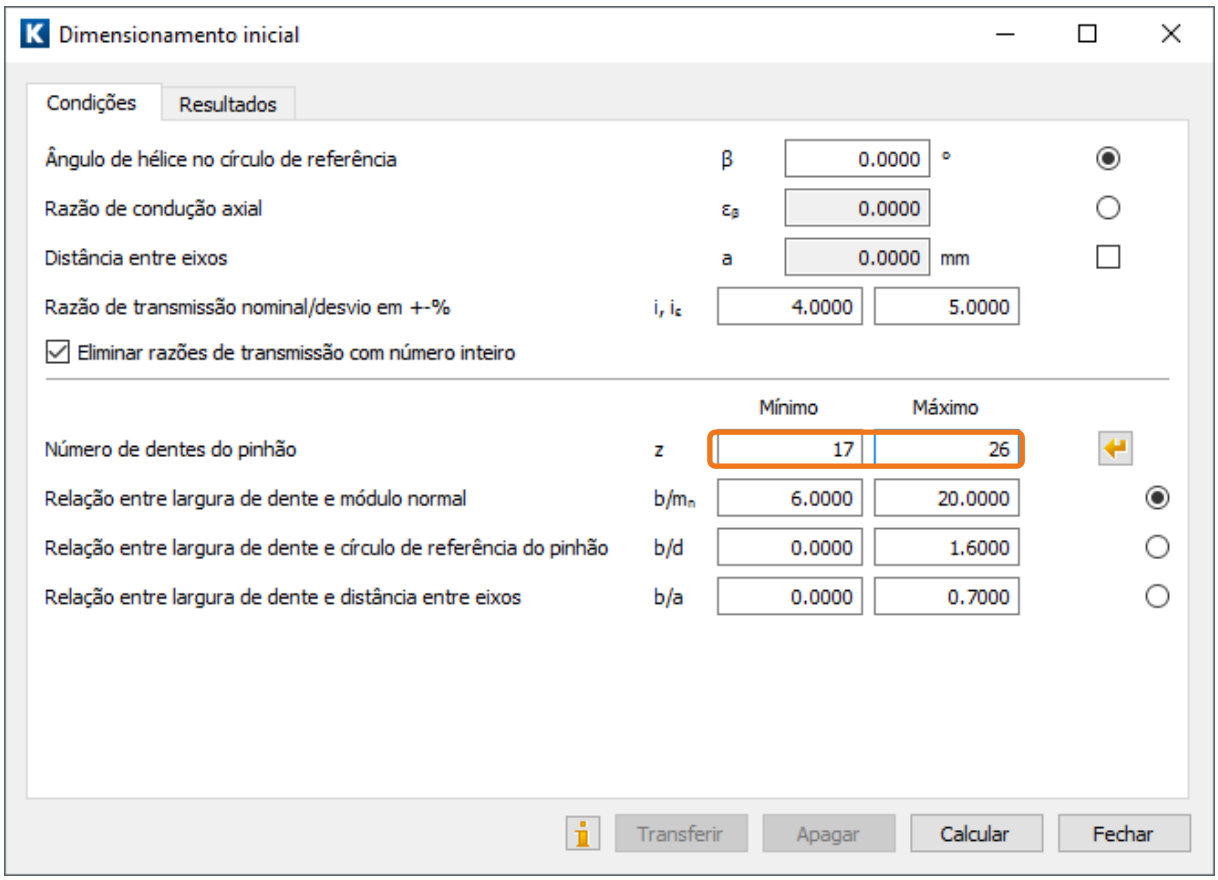


Figura 8. Janela de entrada de dados da função dimensionamento inicial. Especificação do número de dentes para engrenagem 1

Quando você clica no botão para calcular, no dimensionamento inicial, o KISSsoft calcula um variado número de soluções diferentes para um par de engrenagens que satisfaçam as condições especificadas. Essas soluções são então apresentadas em uma lista, como mostra a figura abaixo.

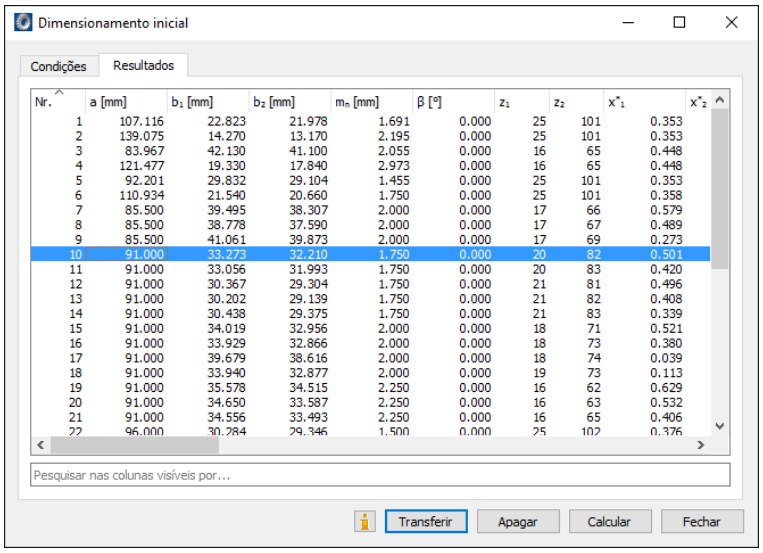
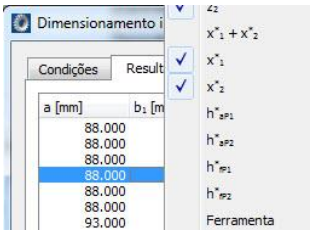


Figura 9. Engrenagem cilíndrica – Resultados do dimensionamento inicial

Clique com o botão direito do mouse sobre os resultados para selecionar quais critérios você quer listar como a distância entre centros a, largura de dente b, etc. com “Mostrar/esconder colunas...”



Para aceitar uma solução em particular (no caso do exemplo, com distância entre centros de 91mm), selecione a variação na lista e clique em “**Transferir”** para transferir os dados e depois no botão **"Close"** para fechar a janela.

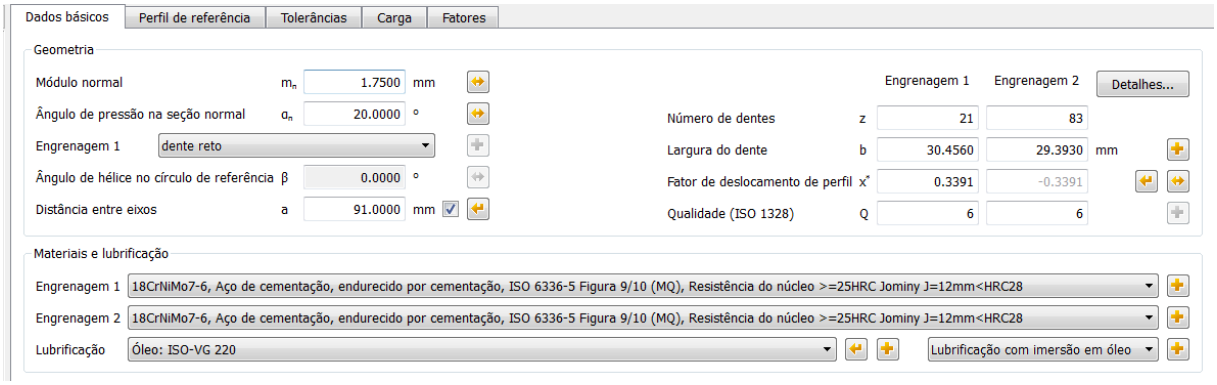


Figura 10. Módulo normal, número de dentes, largura do dente, deslocamento de perfil e distância entre centros ostradas segundo a sugestão do KISSsoft

Para acessar diretamente este estágio do processo de cálculo, abra o arquivo "Tutorial-009-Step2".

2.3 Modificações

Agora você pode mudar os valores que foram propostos. Por exemplo, para a largura da engrenagem, você pode colocar, diretamente na janela apropriada, 30mm no pinhão e 29mm na coroa.

No **"Perfil de referência"** é onde você pode modificar a referência do perfil do dente, na lista que se abre.

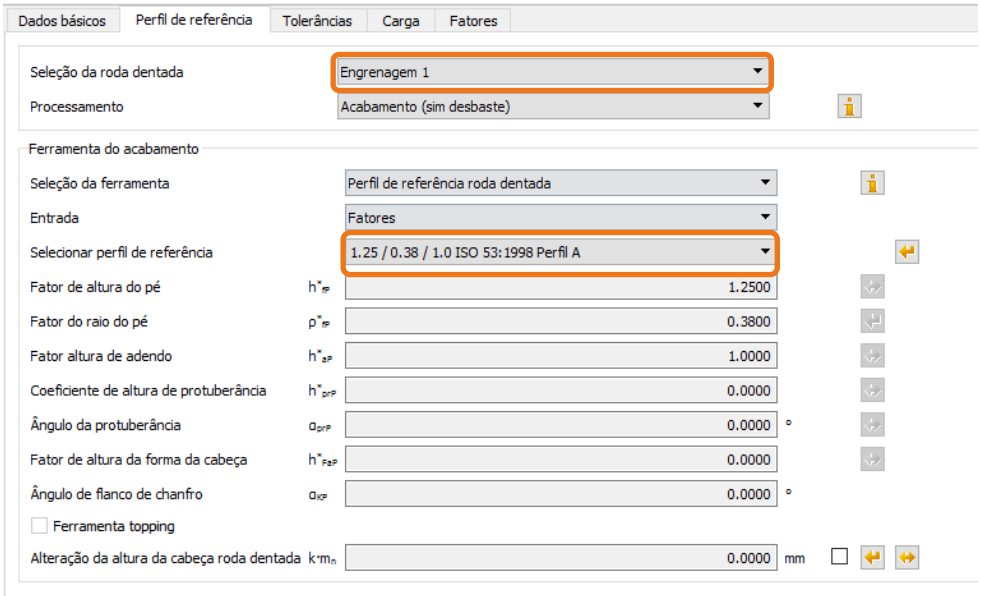


Figura 11. Aba “Perfil de referência” – informações sobre o perfil de referência para o dentado

Você também pode mudar deslocamento de perfil do pinhão (a coroa é dimensionada a partir deste valor e da distância entre centros, quando esta está fixada) da seguinte maneira: Clique no botão de dimensionamento para abrir a janela do **"Definir fatores de deslocamento de perfil"**, que contém diferentes valores propostos para deslocamento de perfil (Figura 12):

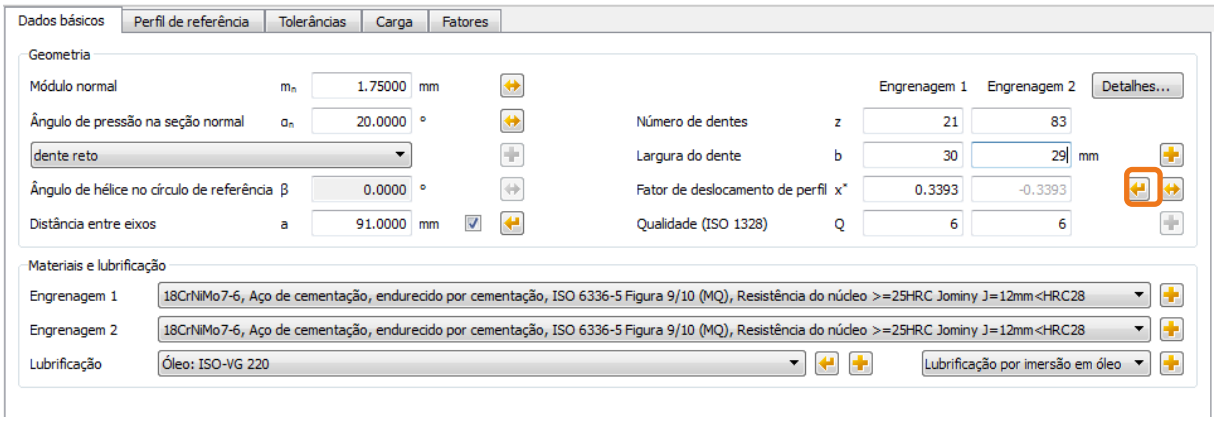
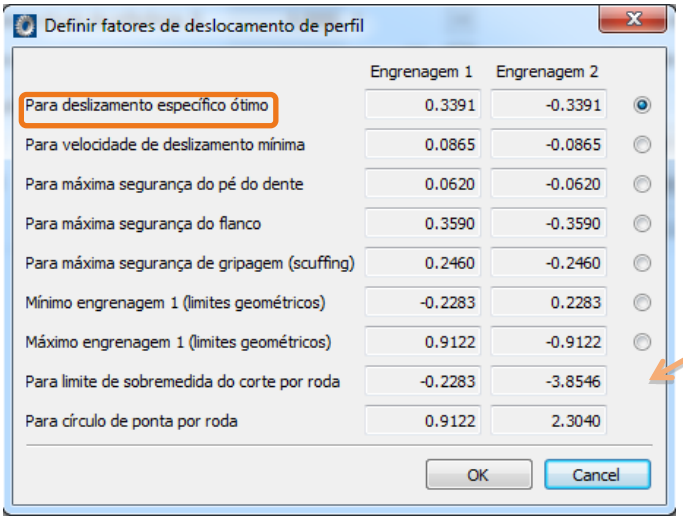


Figura 12. Abrir janela de Fator de deslocamento de perfil



- Vários métodos para dimensionar o deslocamento de perfil
- Sugestões sensatas para o deslocamento de perfil
- Máximo e mínimo. (Mínimo círculo na ponta do dente sem recorte)

Figura 13. Coeficiente de deslocamento de perfil modificado, visão geral dos resultados após rodar o cálculo

O sistema propõe valores de deslocamento apropriados para diferentes critérios. Neste exemplo, procuramos uma melhor razão de condução. Clique no botão de marcação à direita para selecionar sua escolha e então cloquei em **"OK"** para aceitá-la.

O coeficiente de deslocamento de perfil “x” é, então, transferido para o campo de entradas na aba de **"Dados básicos"**, no grupo "Geometria". Na sequência,  clique em na barra de ferramentas ou aperte “F5” para rodar o cálculo completo da geometria, segurança da raiz e flanco, segurança contra gripagem e a razão de condução resultante (veja na figura 14 abaixo). Os resultados devem ser como os da figura (variações mínimas podem ocorrer, como no cálculo do deslocamento de perfil).

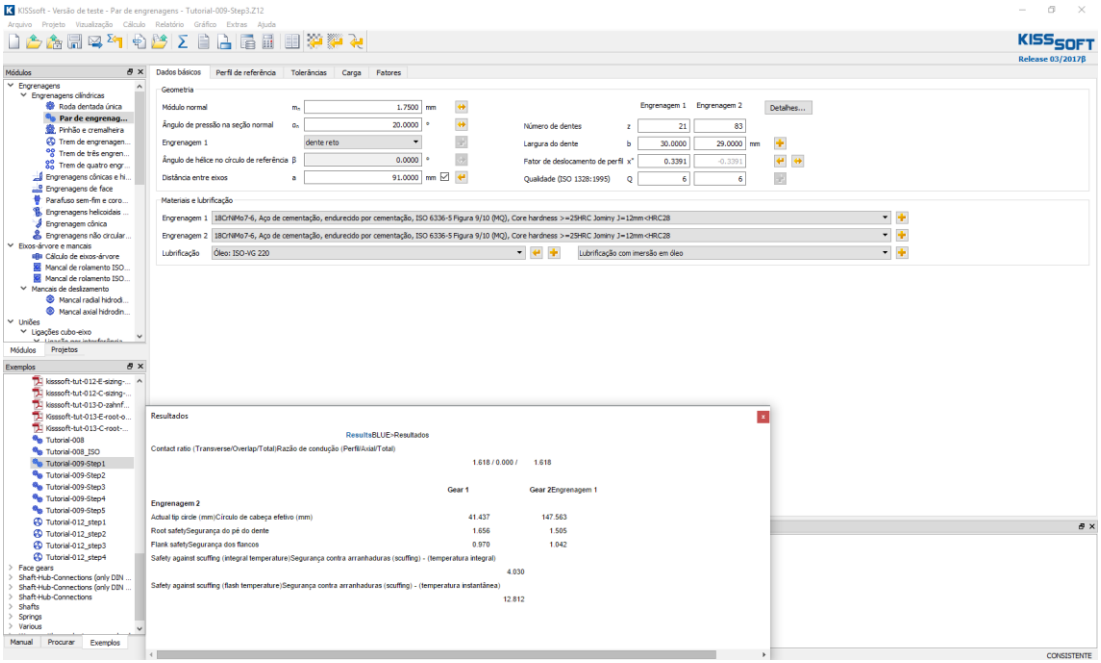


Figura 14. Coeficiente de deslocamento de perfil modificado, visão geral dos resultados após rodar o cálculo

Para acessar este estágio do processo de cálculo, abra o arquivo "Tutorial-009-Step3".

3 Dimensionamento Fino

3.1 Abrindo a função de dimensionamento fino

Agora que você já usou a função de dimensionamento inicial para definir um par de engrenagens que possa transmitir a força requerida, você pode otimizar as características de resistência e o ruído do engrenamento. Assim como para o dimensionamento inicial, clique em **"Cálculo"** e então selecione **"Dimensionamento fino"** para abrir a janela da função.

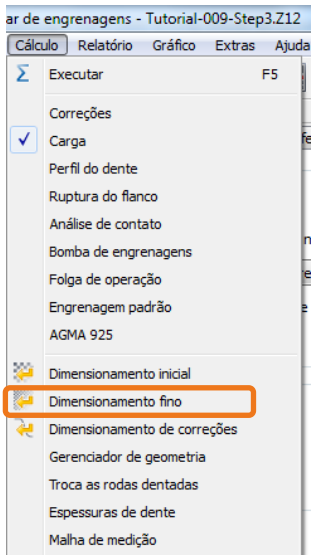


Figura 15. Abrindo o "Dimensionamento fino

Aqui você pode definir faixa de valores e intervalos para os seguintes parâmetros. O KISSsoft irá procurar soluções sensatas entre estes valores.

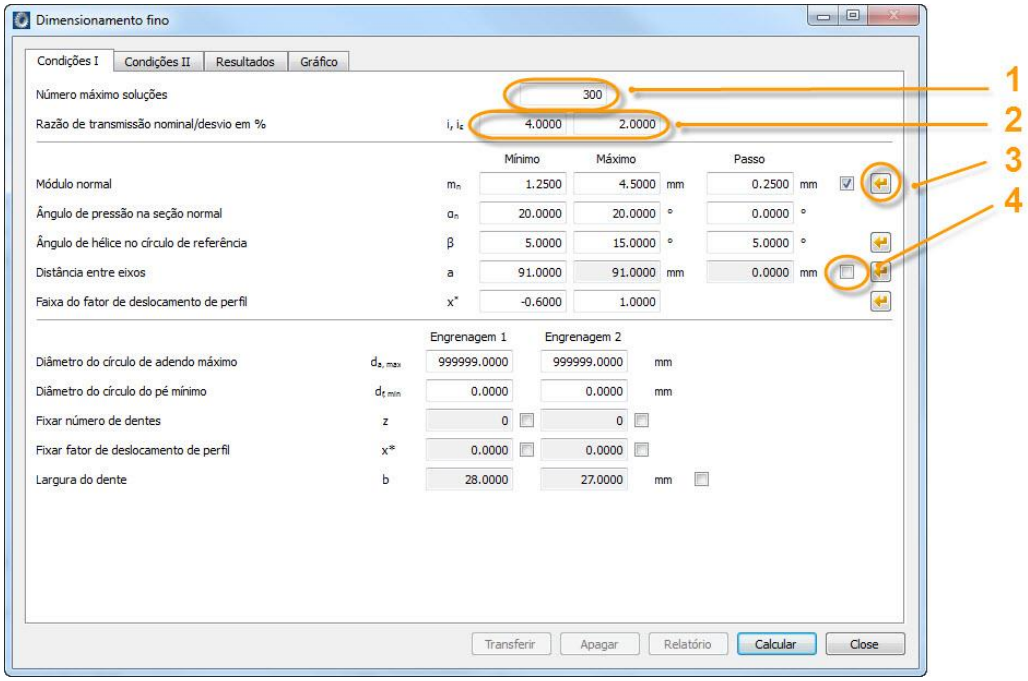


Figura 16. Janela de entrada de dados para o dimensionamento fino

(1) Insira 300

(2) Defina a relação de transmissão de projeto (4) e um desvio para a mesma (2%)

(3) Clique nos botões de Dimensionamento  para ter propostas sensatas do programa para a faixa de valores dos parâmetros: **“Módulo”**, **"Ângulo de hélice", "Distância entre centros"** e **"Faixa do fator de deslocamento de perfil"** parâmetros

(4) Especifique se a distância entre centros deve ser fixada ou não

- Faixa de valores para módulo normal (1.25...4.5)
- Faixa de valores para ângulo de hélice (5º...15º)
- Faixa de valores para distância entre centros (escolha a opção de distância variável aqui) (Uma observação é que alguns valores vêm do processo de dimensionamento inicial)

Você pode também pré definir estes valores:

- Limite máximo para o diâmetro da cabeça
- Mínimo diâmetro na raiz
- Fixar o número de dentes para uma ou duas rodas dentadas
- Especificar o deslocamento de perfil para uma ou duas rodas dentadas

Neste exemplo, arranje os parâmetros como mostra na Figura 15. Logo, clique em **"Calculate”**. O algoritmo do dimensionamento fino roda suas iterações procurando todas as combinações possíveis e sensatas que se encaixem nos valores que você especificou.

Assim que o cálculo finalizar, você verá uma lista com todas as soluções que o sistema encontrou (Figura 16). A meta neste exemplo é um engrenamento menos ruidoso possível. Aqui você pode listar as soluções de acordo com o critério que desejar (ex.: ε_α, ε_β ou ε_γ) para encontrar a melhor solução (dependendo da estratégia escolhida, ε_α e ε_β devem ser valores inteiros, se possível ou ε_γ como um valor inteiro, se possível). Selecione a solução desejada e dê um duplo clique – ou clique no botão "Transferir" para aceitar os dados e voltar para interface principal. Se você perceber que esta solução não é a melhor, você pode sempre abrir a função de dimensionamento fino e escolher outra variante até encontrar o seu resultado ótimo. A solução 52 será a escolhida no nosso exemplo.

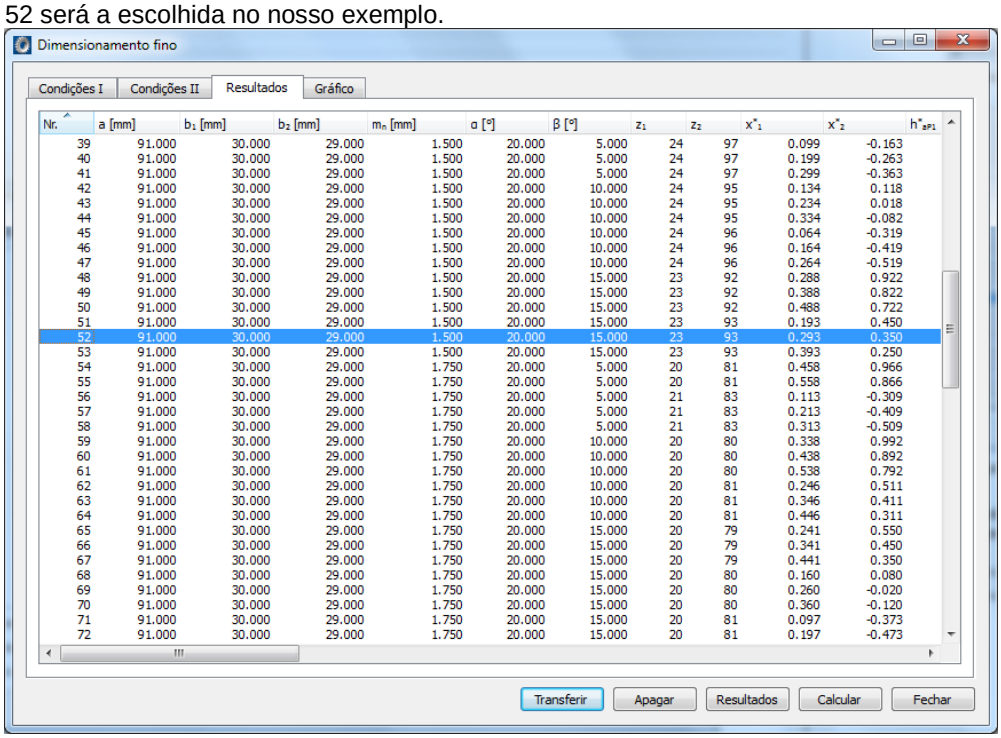


Figura 17. Lista de todas soluções encontradas de acordo com a faixa de parâmetros escolhida

Clique no botão **“Relatório”** para gerar um relatório com as informações mais importantes desta solução.

```
Analysis of the results     (Assessment of important characteristics)

Comment:
No.       = Number of the variant
diff_i    = Deviation from the nominal ratio in %
kg        = Weight in kg
Slide     =                            Specific                            sliding                            (maximum
value)
```

```
v.Slide   = Sliding velocity (m/s, maximum value)
AC/AE     = Begin working depth AC / working depth AE
          (Friction)
del_cg    = Variant on the stiffness during rolling (N/mm/mym)
1-eta     = Losses in % (1.0-total efficiency)
Safety    = Safety (Tooth root and flank, 0 = high, 1 = medium, 2 = low)
          (SF-min: 0.60/ 1.20/ 1.40   SH-min: 0.60/ 0.90/ 1.00)
Summary   = Overall assessment (weighted)
          (50.0%:del_cg 20.0%:diff_i  100.0%:kg35.0%:Slide       0.0%:v.Slide
          0.0%:AC/AE        10.0%:1-eta       100.0%:Safety)

(For this table it can be said in general: the smaller the value the better!)

No.       diff_i    kg        Slide     v.Slide AC/AE      del_cg    1-eta     Safety    Summary
          1         -1.724    3.879     0.975     0.160    0.521     1.201     1.107     1.504     0.701
          2         -1.724    3.870     0.815     0.160    0.473     1.250     1.095     1.514     0.704
          3         -1.724    3.862     0.675     0.173    0.425     1.256     1.119     1.523     0.707
...
          51        1.087     3.937     1.331     0.184    0.503     0.312     1.372     1.223     0.579
          52        1.087     3.926     1.076     0.196    0.457     0.307     1.371     1.245     0.587
 ...

Analysis of the results
(with the variant index in decreasing order)

Best variants for accurate ratio:    7         8         9         27        28        29        36        37        38...
Best solutions for weight:  23       3         19        22        2         18        6         26        21        9 ...
Best variants relative to friction (AC/AE):   157       158       159       154       155       156       127       ...
Best solutions for stiffness:        46        47        42        43        101       103       44        45...
Best variants for strength: 68       65        69        71        66        70        72        67        73...
Best overall variants (summary)      :         68        69        70        65        66        67        71...
```

Figura 18. Avaliação das soluções

Nota importante: A descrição do método neste tutorial é o mais simples e reduzida possível. Numa situação prática, é importante analisar detalhadamente a lista de resultados. É bastante possível que a segunda ou terceira melhor solução em termos de emissão de ruído seja escolhida levando em conta outros parâmetros. Uma visão geral das variantes na aba **"Gráfico"** também ajuda bastante a tomar a melhor decisão.

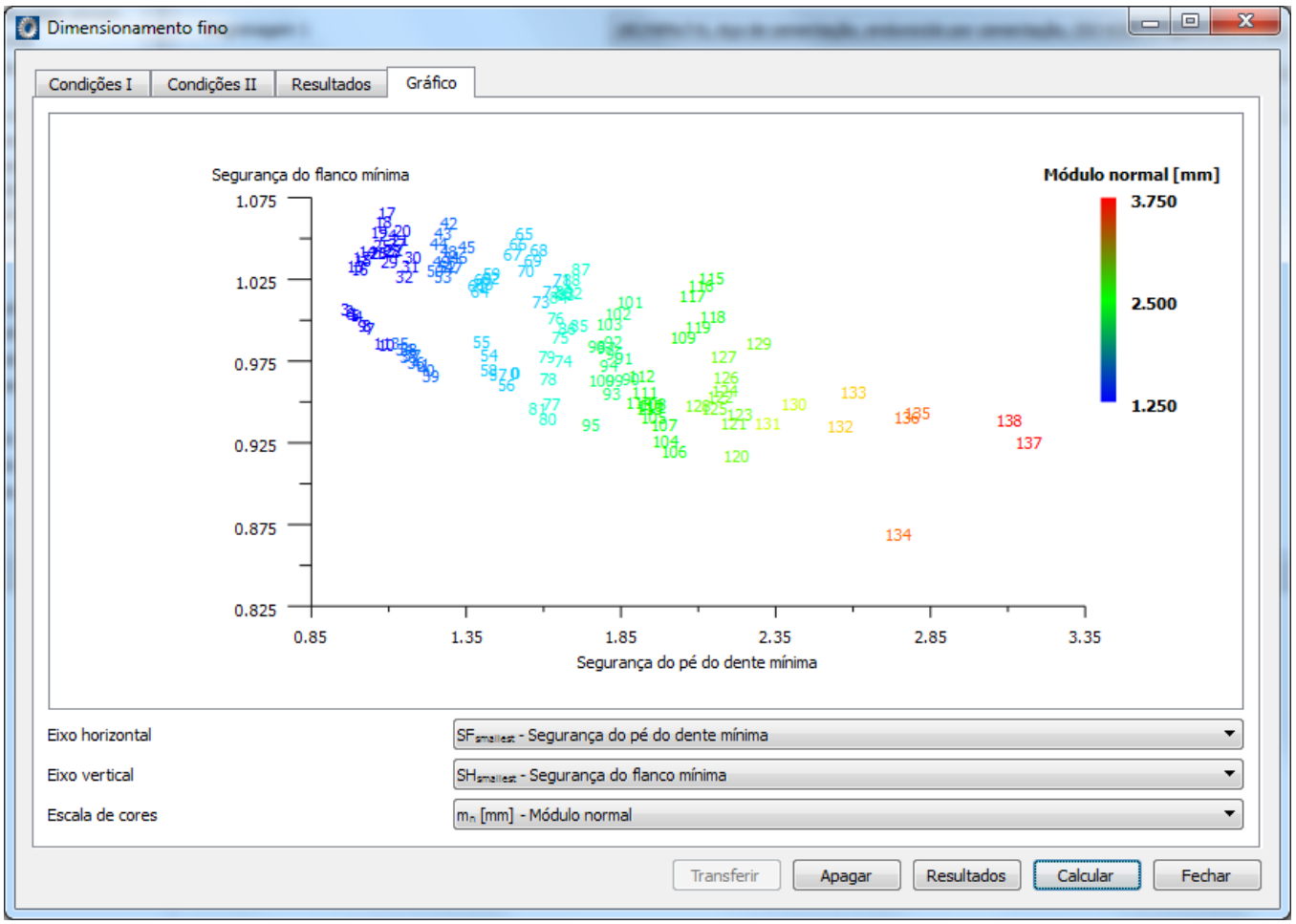
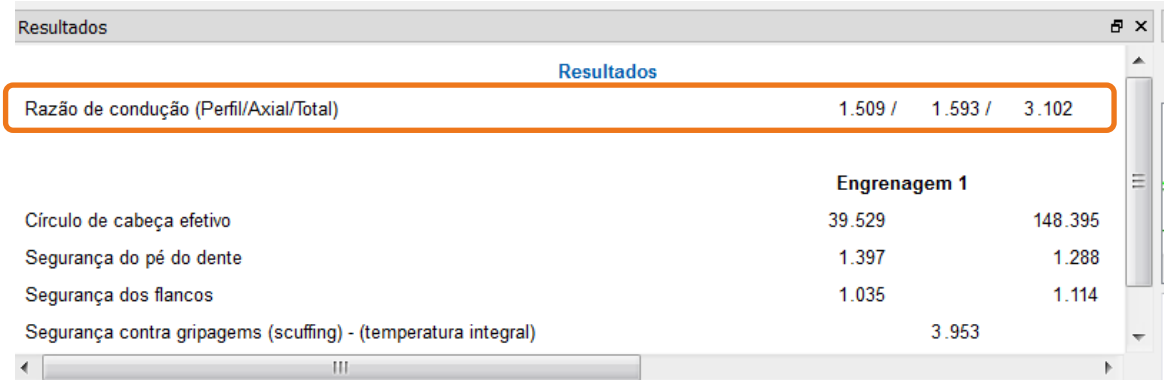


Figura 19. Exibição gráfica das soluções

Gráficos podem ajudar a chegar mais facilmente na melhor solução (neste caso, referente à segurança do(a) flanco/raiz). Para escolher a solução, você pode voltar na aba **"Resultados".**

3.2 Resultados da função dimensionamento inicial

A razão de contato total ficou muito perto de 3.10, o que significa que as variações ao longo do contato entre dentes é bastante pequena (Figura 19) e, portanto, as vibrações geradas serão menores.



Para acessar este estágio do processo de cálculo, abra o arquivo "Tutorial-009-Step4".

Figura 20. Resultados do dimensionamento fino (deslocamento de perfil, ângulo de hélice, número de dentes)

A forma do dente resultante pode ser vista graficamente na janela “Geometria 2D”. Você pode clicar em ou fazer um clique duplo na área cinza do gráfico para vê-lo como uma janela flutuante e ter a possibilidade de mover e redimensionar.

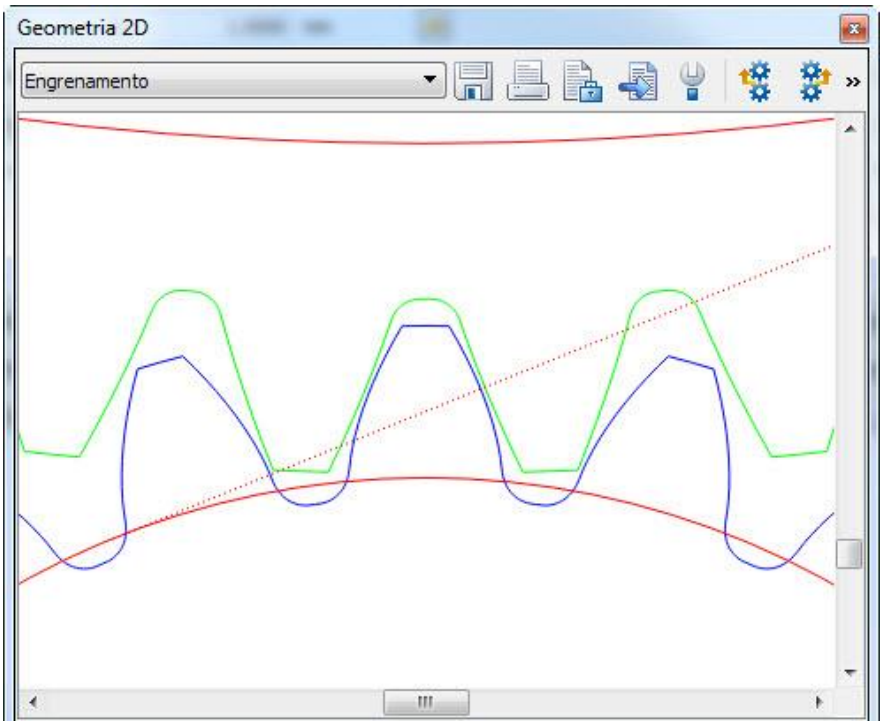


Figura 21. Forma de dente resultante (círculos de base e linha de contato em vermelho)

Para ver a curva de rigidez, clique em **"Gráfico"→ "Avaliação"→Rigidez de contato teórica"**:

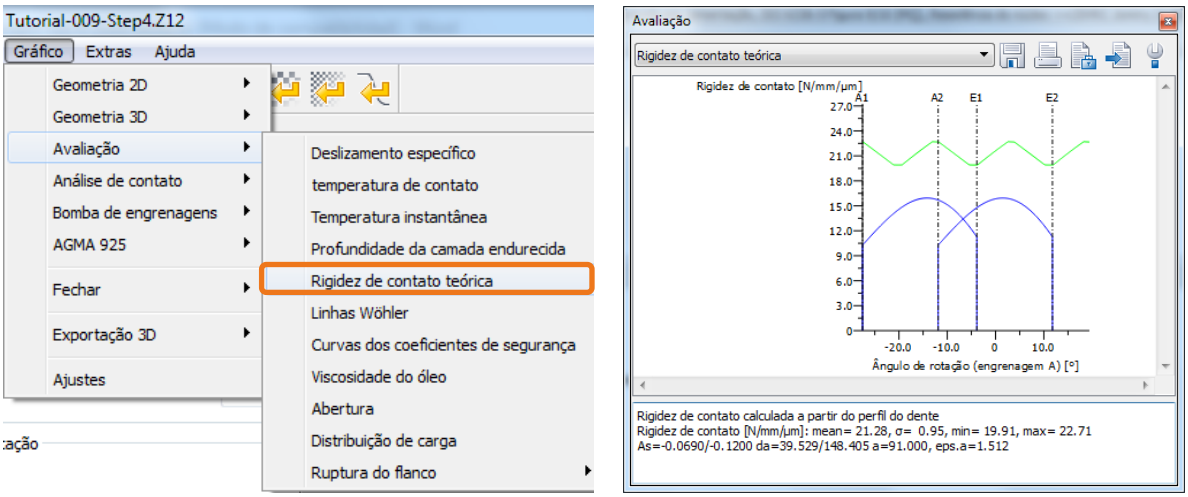


Figura 22. Rigidez de contato teórica

3.3 Dimensionando um perfil de dente alto

No próximo passo, você pode aprimorar a solução escolhida. Para tal, vá em **"Ajustes específicos do módulo"** em **"Dimensionamentos"**, e aumente a razão de condução transversal ε_α para 2. Se você quiser aplicar um alívio de cabeça depois, você precisará de uma maior razão de condução pois a mesma será reduzida com o alívio na cabeça. Você também pode aumentar a razão de condução usando um perfil de dentado alto.

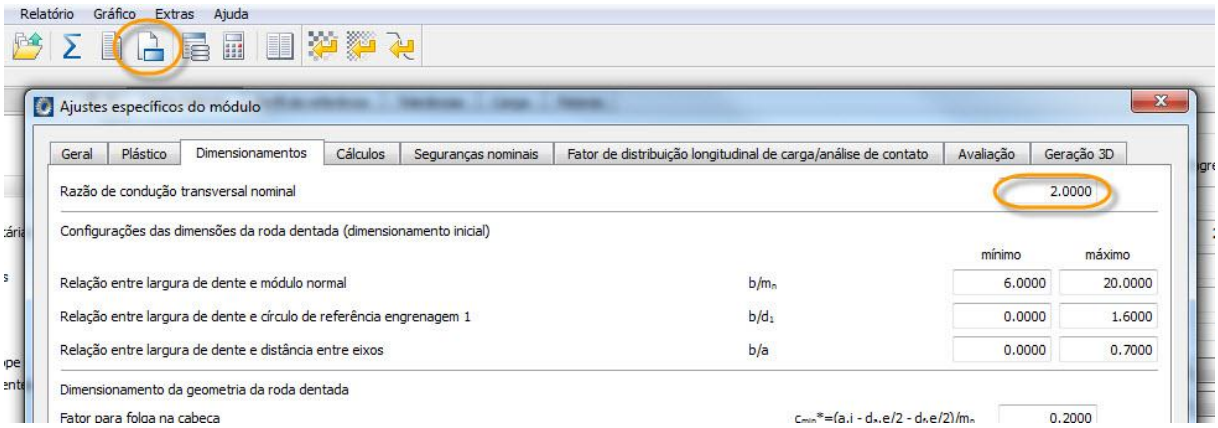


Figura 23. Ajustes específicos do módulo

Para dimensionar um dentado alto, abra a função Dimensionamento Fino novamente, vá na aba "**Condições III**" e escolha uma opção na lista da opção **"Dentado alto"** que se abre. Clique em calcular para obter novos resultados.

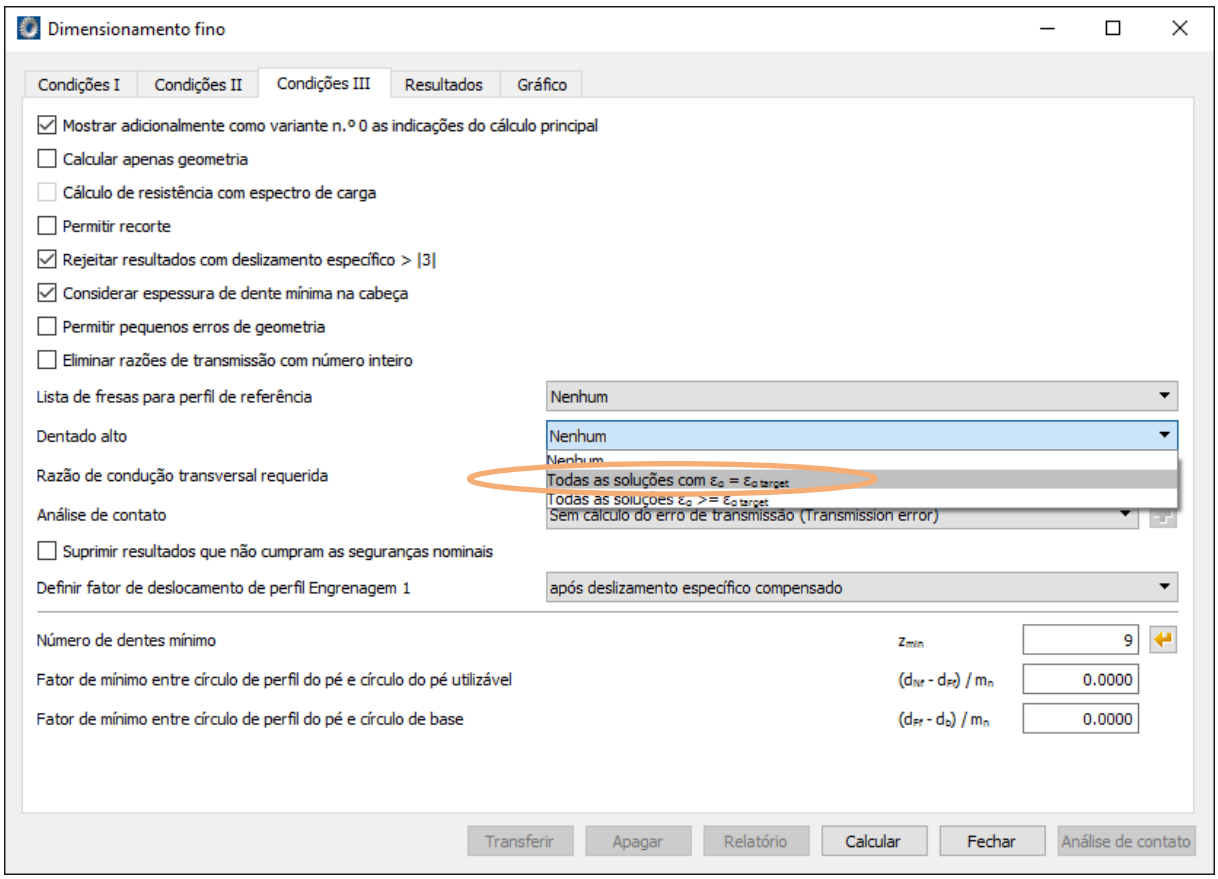


Figura 24. Configurações para o dimensionamento fino

Agora, a melhor solução em termos de emissão de ruído é a solução 46. Selecione essa variante e clique em **"Transferir"** para transferir os dados. Ao escolher a forma alta do dentado, o perfil de referência mudou. Os dados da solução aceita estão agora na janela principal (foram mudados número de dentes, ângulo de hélice, deslocamento de perfil) e já foram calculados imediatamente após o resultado ser aceito, como mostra a mensagem "CONSISTENTE" , abaixo, no canto direito.

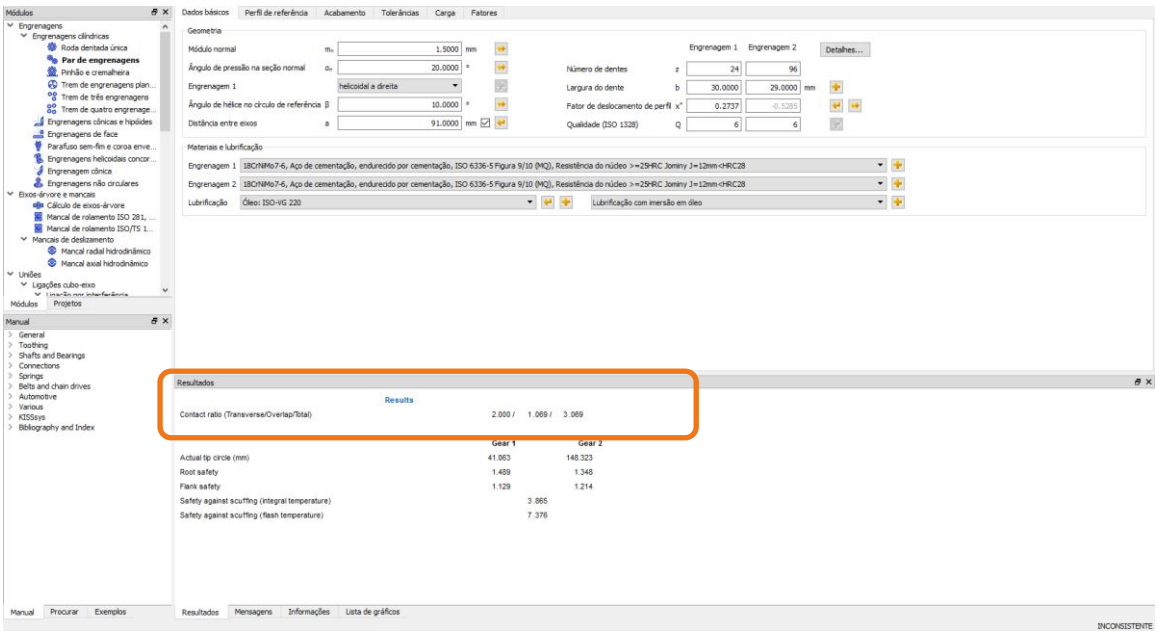


Figura 25. Novos dados de engrenamento e novos resultados.

Para acessar este estágio do processo de cálculo, abra o arquivo "Tutorial-009-Step5".

A forma do dente resultante pode ser vista graficamente na janela “geometria 2D”. Você pode clicar em ou fazer um clique duplo na área cinza do gráfico para vê-lo como uma janela flutuante e ter a possibilidade de mover e redimensionar.

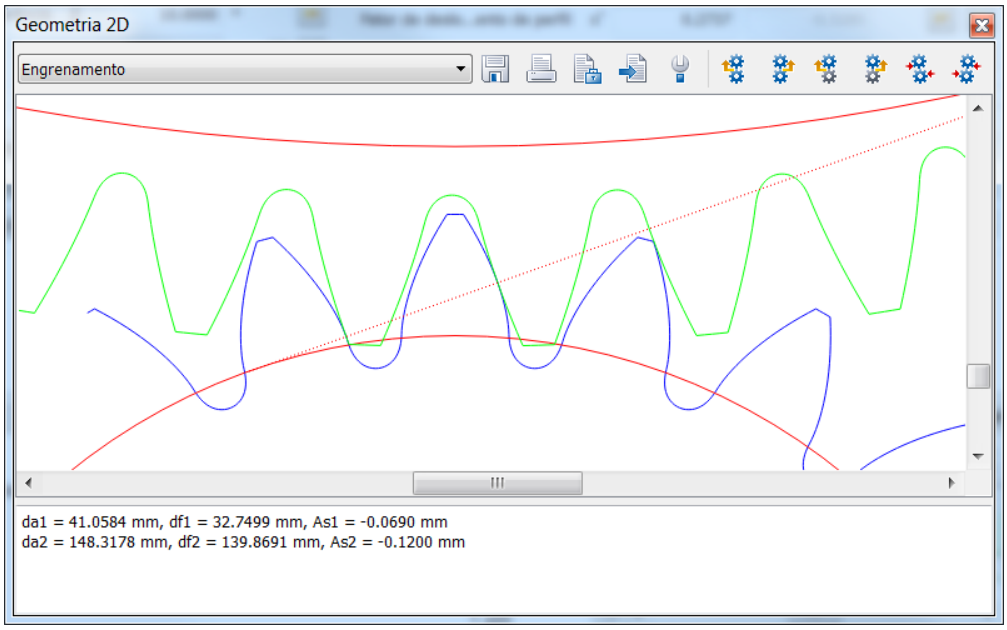


Figura 26. Gráfico do engrenamento resultante

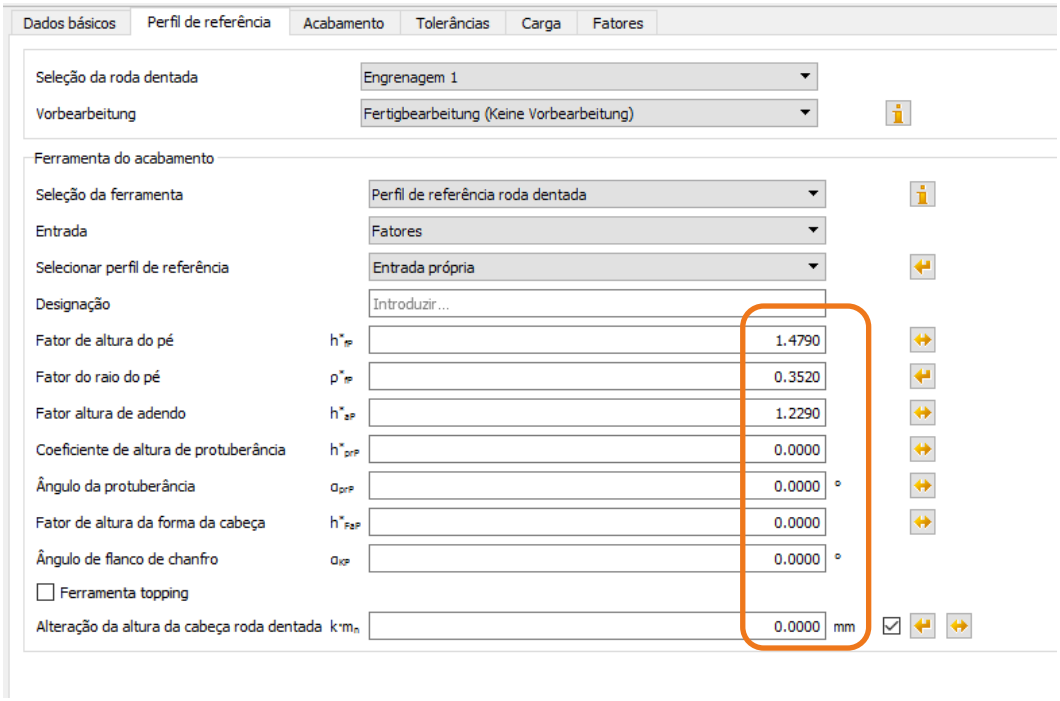


Figura 27. Visualização dos dados do perfil de referência do dentado alto na aba “perfil de referência”

O resultado da razão de condução agora é muito próximo de 3, o que resulta em uma rigidez de contato teórica bastante estável.

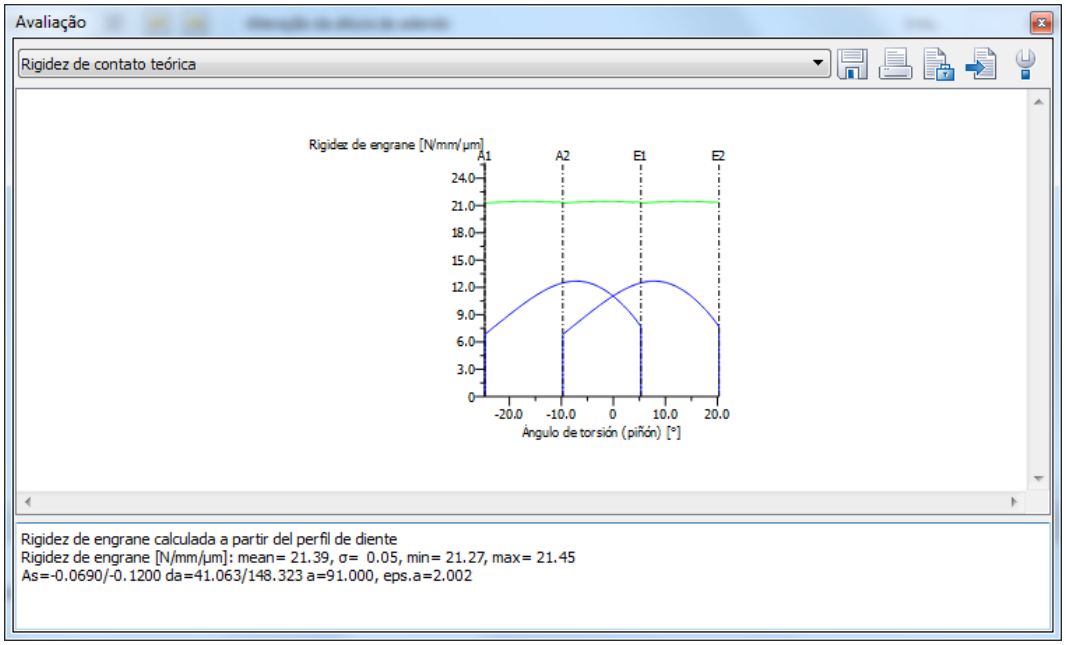


Figura 28. Curva da rigidez de contato teórica sobre o contato

3.4 Mais detalhes sobre análise de rigidez

Para uma análise final da rigidez de uma engrenagem, você deve entrar com os dados da lubrificação e com o fator longitudinal de distribuição de carga.

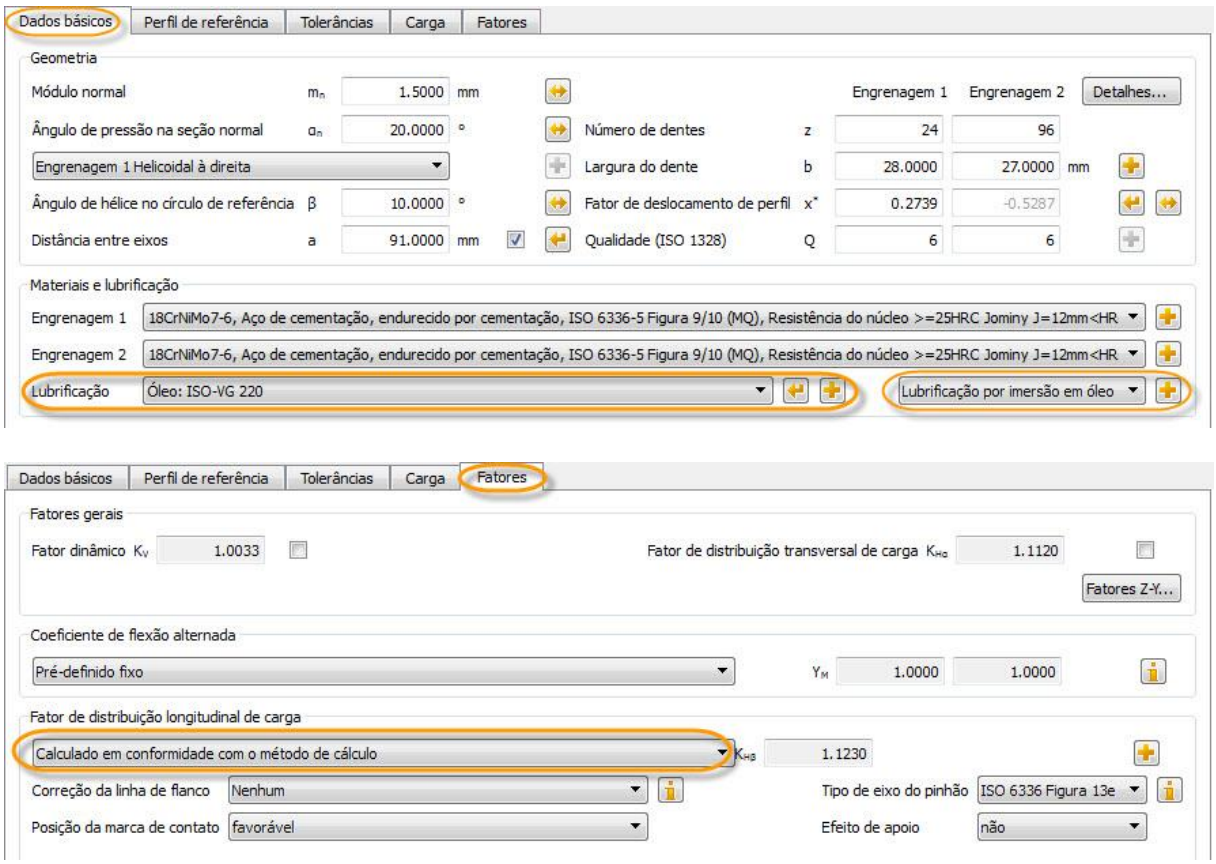


Figura 29. Entrada de dados da lubrificação e para o fator de distribuição longitudinal de carga

Você tem a opção de escolher o tipo de lubrificação assim como o próprio lubrificante através da lista (a lista se abre ao clicar sobre a mesma). Ainda, você pode usar a ferramenta do banco de dados e adicionar um novo lubrificante. Clique no botão (à direita da janela que contém o tipo de lubrificação) para escolher a temperatura do lubrificante.
Entre com a temperatura de operação e temperatura ambiente, ou com a temperatura da carcaça na aba **"Folga de operação",** como mostra a figura abaixo.

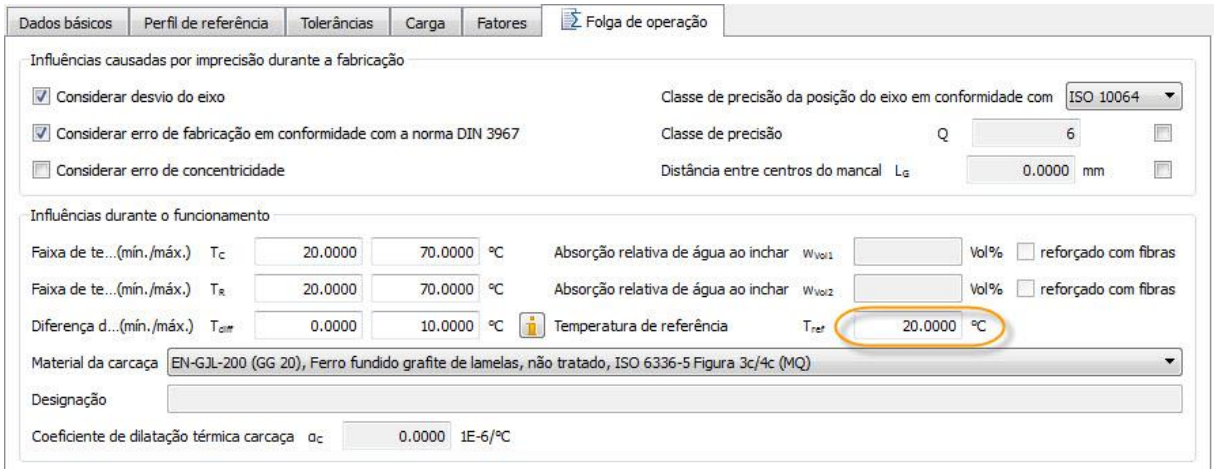
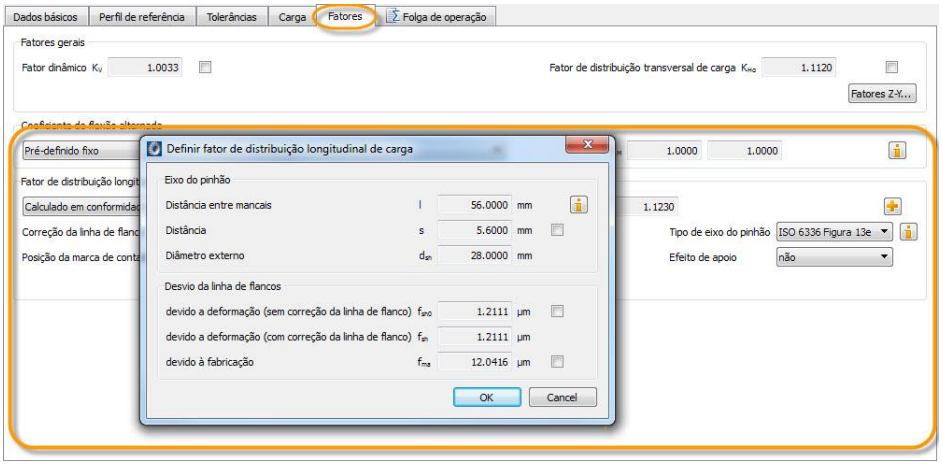


Figura 30. Folga de operação



O fator longitudinal de carga pode ser determinado usando os Métodos A, B ou C. Você encontrará mais informações sobre este assunto na instrução “kisssoft-anl-072-E-Contact-Analysis-Cylindrial-Gears”, disponível em inglês no website da KISSsoft. Entretanto, geralmente não é preciso aplicar mudanças nesta seção.

Figura 31. Entrada de outros valores especialmente para a definição do fator de distribuição longitudinal de carga

Nota importante:
Se a análise de resistência ou cálculo da vida útil é relevante para a avaliação da variante calculada pelo dimensionamento inicial, estas variáveis listadas acima devem ser definidas antes de abrir o dimensionamento inicial.